第 39 卷 第 6 期
2022 年 12 月

应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 39 No. 6
Dec. 2022

ChinaXiv合作期刊

文章编号:1000-4939(2022)06-1117-08

红砂岩粗粒料颗粒破碎的分形维数指标及影响因素分析

谢宝香,高文华,易梅辉,张宗堂,邬俊

(湖南科技大学 岩土工程稳定控制与健康监测湖南省重点实验室,411201 湘潭)

摘 要:红砂岩粗颗粒土剪切过程中的颗粒破碎现象已被广泛认识,本研究采用大型三轴试验仪对红砂岩粗粒料进行了不同围压、不同级配、不同压实度下的固结不排水剪切试验,并对试验前后的颗粒进行筛分,得到试验前后不同粒径颗粒的分布变化,最后运用分形维数作为颗粒破碎度量指标探讨颗粒破碎影响因素。试验结果表明:粗颗粒含量越高,颗粒破碎程度越大,分形维数随粗颗粒含量的减小而增大;在保持级配围压相同的情况下,压实度的提高使分形维数 D 和颗粒破碎程度略有增大,说明压实度对颗粒破碎的影响很小;颗粒破碎对红砂岩粗粒料的峰值强度及内摩角的影响较大。结论可为进一步研究红砂岩粗粒料的变形特性提供依据。

关键词:红砂岩;颗粒破碎;分形维数;大型三轴试验

中图分类号:TU411 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2022.06.012

chinaXiv:202212.00124v1

Analysis of fractal dimension index and influencing factors of red sandstone coarse granular material breaking

XIE Baoxiang, GAO Wenhua, YI Meihui, ZHANG Zongtang, WU Jun

(Hunan Provincial Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Stability Control and Health Monitoring, Hunan University of Science and Technology, 411201 Xiangtan, China)

Abstract: The phenomenon of particle breaking during the shearing process of red sandstone coarse-grained soil has been widely recognized, and a large number of experiments and theoretical studies have been conducted. In this paper, a large-scale triaxial test was carried out on the red sandstone coarse-grained material under different confining pressures, different gradations, and different degrees of compaction. Consolidation and undrainage tests were carried out, and the particles before and after the test were screened to obtain different particle sizes before and after the test and the distribution of particles changes. Finally, the fractal dimension was used as a measure of particle breakage to discuss the factors affecting particle breakage. The test results show that the higher the content of coarse particles, the greater the degree of particle breakage, and the fractal dimension increases with the decrease of the content of coarse particles; under the condition of keeping the same gradation and confining pressure, the increase of com-

收稿日期:2021-09-29 **修回日期**:2022-08-07

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(No. 2020JJ4019);湖南科技大学岩土工程稳定控制与健康监测省重点实验室开放基金资助项目(No. E21807);湖南省研究生科研创新资助项目(No. CX20190790)

通信作者:高文华。E-mail:wenhuagao@163.com

引用格式:谢宝香,高文华,易梅辉,等.红砂岩粗粒料颗粒破碎的分形维数指标及影响因素分析[J].应用力学学报,2022,39(6):1117-1124.
XIE Baoxiang, GAO Wenhua, YI Meihui, et al. Analysis of fractal dimension index and influencing factors of red sandstone coarse granular material breaking[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(6):1117-1124.

ChinaXiv合作期刊

paction makes the fractal dimension D and the degree of particle crushing gradually increase, but the impact of compaction on particle crushing is small; the particle breakage has an appreciable effect on the peak strength and angle of internal friction of the red sandstone coarse granular material. It provides a basis for further research on the deformation characteristics characteristics of red sandstone coarse-grained materials.

Key words: red sandstone; particle fragmentation; fractal dimension; large-scale triaxial test

红砂岩粗粒土广泛分布于我国的华东、华南及西南等地区,常作为公路的路基填料。在车辆荷载和路基围压的作用下,粗粒料颗粒之间点与点相互接触,发生颗粒破碎现象[1]。即使施加的的荷载和围压不大时,也易发生上述现象。上述现象的发生对粗粒土的强度和变形特性和路基路面的安全稳定性造成了显著的影响。这些都要求对红砂岩粗粒料的颗粒破碎现象能进行深入研究,而颗粒破碎的影响因素和度量参数是研究的重要内容。

国内外学者对颗粒破碎的影响因素与度量指标进行了大量的研究。郭熙灵等[2]研究发现,随着粗粒料在三轴试验下所受的围压越大,颗粒破碎率越高,内摩擦角越低,剪胀性越小。刘汉龙等[3]对粗粒料进行了大型三轴试验,分析了颗粒破碎、围压、抗剪强度之间的关系,并分别构建了颗粒破碎率与围压及内摩擦角的函数关系式。蔡正银等[4]开展了不同级配、围压和密度的粗粒土的常规三轴试验,试验结果表明级配和围压对颗粒破碎的影响较大。随着围压的增大,颗粒破碎也增大,而密度对其的影响则较小,颗粒破碎主要集中在粒径 20 mm 以上的颗粒范围内。凌华等[5]通过大型三轴排水剪切试验试分析了有无黏性粗粒土的颗粒破碎率与级配、围压的关系,发现随着围压和剪应力的增大,颗粒破碎也随之增大;同等围压作用下,细颗粒含量较高的粗粒土颗粒破碎率高。

唐志强[6]采用改进后的分离式霍普金森压杆(Split Hopson pressure bar, SHPB)装置,分析了火山碎屑岩、砂岩在不同冲击气压下的破坏特征差异和原因以及最大峰值应力,得到了岩石的破坏形式与破碎形态的差异、岩石自身性质、应力波密切相关的结论。杜晓奇等[7]运用离散元软件进行了粗骨料颗粒形态对混凝土单轴压缩性能的影响研究。

由于粗粒土即使在较小的外力作用下也会产生颗粒破碎。为了更好度量不同影响因素下粗粒土的颗粒破碎程度,目前一些学者已提出了一些方法。这些方法是基于试验前后颗粒级配曲线某个特征点的变化或相同粒组颗粒的质量的变化来描述颗粒破碎。Lee 等[8]将破碎因子 B_{15} 作为颗粒破碎度量指标,B_{15} 采用试验前后颗粒累计质量百分比在 15% 的颗粒粒径的比值确定。Marsal 等[9]在试验前后的两条颗粒级配曲线上取某一粒径下百分比相差最大距离 R 来描述颗粒破碎程度。Nakata 等[10]定义了破碎因子 $B_t = 1 - R/100$ 来描述颗粒破碎程度。其中 R 为初始颗粒级配最小粒径 D_0 在试验后的颗粒级配曲线上对应的纵坐标值。Marsal[11]采用破碎率 B_g 来作为度量颗粒破碎的指标。破碎率的定义为相同级配试样试验前、后各粒组的所有含量差值正值之和。Hardin[12]通过引入极限颗粒级配曲线,定义了破碎势 B_p(初始颗粒级配曲线与极限颗粒级配曲线围成的面积)和破碎量 B_t(极限颗粒级配曲线与试验前后的级配曲线所围成面积的差值),进而提出了相对颗粒破率 $B_r = B_t/B_p$ 来度量颗粒破碎。Wood 等[13]提出把级配状态指数作为颗粒破碎的度量方法,表示为级配曲线中当前级配与坐标轴所围成的面积和极限级配与坐标轴所围成面积的比值。级配状态指数的取值范围为[0,1],粒径不均一时则为(0,1]。以上颗粒破碎度量指标,一些指标仅能以某一特定指标颗粒粒径的变化值说明整体颗粒级配的变化,反映过于片面。而另一些指标即使抓住了整体级配变化,但是没有考虑到初始颗粒级配对颗过程中颗粒破碎方面的研究较少。本研究以大型三轴试验为基础,得到不同围压下、不同级配、不同压实度的试样的颗粒级配试验前后的变化值和峰值强度及内摩擦角变化值,运用颗粒破碎度量指标分析不同因素对颗粒破碎的影响,以及颗粒破碎对红砂岩粗粒料的强度特性的影响。

1 三轴试验

1.1 试验仪器

本次试验采用成都东华卓越公司生产的 JSZ-150 粗粒土动静两用三轴试验机进行试验。该试验机不仅可以对粗粒土进行静荷载作用下的试验研究,而且

chinaXiv:202204.00174v1

ChinaXiv合作期刊

也可以研究粗粒土在动荷载作用下的力学特性的变化。此试验仪的试样尺寸为 Φ300 mm×600 mm。

1.2　试验材料

本试验材料取自于湖南干线建设公路，岩性为红砂岩，表面较为粗糙，呈凹凸不平状，如图 1 所示。通过采用 X-粉末衍射仪进行分析，其主要矿物成分为石英、方解石、云母、长石、高岭石、绿泥石、伊利石等 7 种。根据《公路土工试验规程》(JTG E40-2007)对土样进行了含水率的测定，得到土样自然状态下的含水率为 12.86%。



图 1　红砂岩取样点

Fig. 1　Red sandstone sampling points

1.3　试验方法

将处理之后保持天然含水率的土样，放置在 105 ℃的烘干箱里烘干 24 h，然后用一组尺寸和孔径大小不同的圆孔筛对烘干后的土样筛分，获得试验所需的不同粒组的颗粒。根据《公路土工试验规程》(JTG E40-2007)的规定，采用表面振动压实试验仪测定不同级配试样的最大干密度，该试验试样的制备采用干土法。根据三轴固结不排水试验要求的试样尺寸、装填层数，称量一定压实度下的不同级配的各粒组试样的质量，将不同粒组的红砂岩粗粒料分成 5 等份并使其均匀混合。试验前清洗试验机，将乳胶膜绑扎在放入了土工布的底座上，然后将护筒安装上形成型筒，橡胶模提起外翻在成型筒上，使橡皮膜顺直平滑地紧贴在型筒内壁上。运用上述方法将准备好的试样分 5 次依次装入到护筒内，在下次装样之前按照一定的压实度对上个试样进行击实，控制每层土样击实后的高度为 12 cm，待最后一层试样装样及击实之后，打开真空泵抽出橡胶模内的空气使其变成真空，从而使试样直立，最后在保证没有真空漏气现象再卸掉护筒，制成直径 300 mm、高度为 600 mm 的圆柱形试样。如图 2 所示。试样制好后盖上压力罩，使压力罩与底座紧密贴合锁紧，然后将整个试样和压力室推进试验加载区内，往压力室内注水。采用水透饱和法使试样完全饱和，待试验仪的自动控制系统对试样完成各向等压固结完成后，采用轴向静荷载加载稳定系统进行加载，试样剪切速率为 1.5 mm/min。当应力应变曲线出现峰值点或轴向应变达到 15% 时，即认为轴向应力达到试样抗剪强度，发生剪切破坏。



图 2　红砂岩试样

Fig. 2　Red sandstone sample

1.4　试验方案

为了获取级配良好的土样并研究级配中粗颗粒含量对粗粒土力学性质的影响，采用朱俊高提出的级配方程[14]来控制颗粒级配。

$$p=\frac{100}{(1-b)\left[\frac{d_{\max}}{d}\right]^{m}+b} \tag{1}$$

式中：d 为级配范围内任意粒径大小(mm)；p 为粒径小于 d 的颗粒所占百分比(%)；$d_{\max}$ 为最大粒径(mm)；b 和 m 为参数。根据级配良好指标 $C_u\geqslant5$，$C_c=1\sim3$ 的要求，获得指标与上述两个参数的关系，即

$$C_u=\left[\frac{6(1-0.1b)}{1-0.6b}\right]^{\frac{1}{m}} \tag{2}$$

$$1<C_c=\left[\frac{3(1-0.1b)(1-0.6b)}{2(1-0.3b)^2}\right]^{\frac{1}{m}}<3 \tag{3}$$

设定符合级配良好要求的指标，由式(2)、式(3)得到不同的参数 b 和 m 的值，如表 1 所示。根据级配方程获得 4 种良好的颗粒级配。级配曲线如图 3 所示。

依据前面设计的 4 组良好级配，对试样开展相同压实度、不同级配、不同围压的三轴不排水剪切试验。此外为了研究压实度对颗粒破碎的影响，采用单一变量法对级配 2 试样进行了相同围压下的不同压实度三轴不排水剪切试验。根据《公路路基设计规范》(JTG D30-2004)，公路路基填料压实度分别取 92%、94%、96% 以满足不同深度的路基填料要求，具体试验方案如表 2 所示。三轴试验结束后，将试

chinaXiv:202212.00124v1

ChinaXiv合作期刊

样收集进行风干、烘干，然后用标准圆孔筛和天平对试样分别进行筛分和称量，得到不同级配中不同粒组的颗粒新百分含量。

表 1 固定 C_u 和 C_c 的级配参数

Tab. 1 Fixed C_u and C_c grading parameters

C_u	C_c	b	m	级配
30	1.5	0.682	0.661	1
20	1.5	0.599	0.726	2
20	2.0	-0.043	0.591	3
20	2.6	-1.060	0.467	4

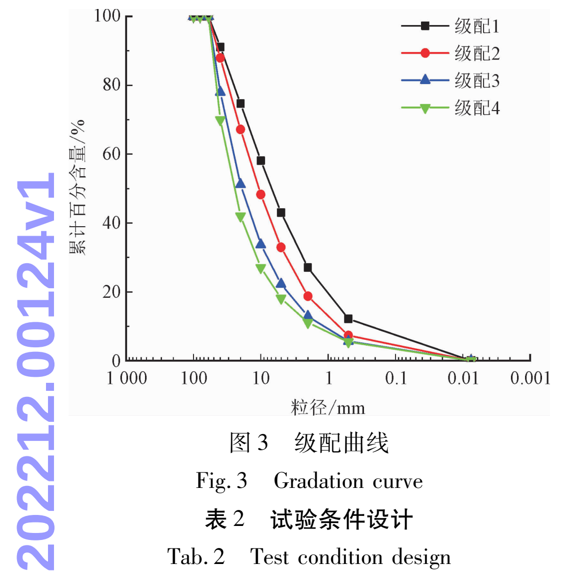


图 3 级配曲线

Fig. 3 Gradation curve

表 2 试验条件设计

Tab. 2 Test condition design

试验编号	级配	围压/kPa				压实度/%	剪切速率/(mm·min^{-1})
SG01	1	50	100	150	500	94	1.5
SG02	2	50	100	150	150	94	
SG03	3	50	100	150	500	94	
ST04	4	50	100	150	500	94	
SD01	2		100			92	
SD02	2		100			94	
SD03	2		100			96	

2 颗粒破碎的度量

粗粒土材料在发生颗粒破碎后，颗粒级配相应也会发生变化。许多专家学者基于破碎前后的颗粒级配提出了 B_{15}、R、B_r、I_G、B_t 颗粒破碎指标度量颗粒破碎。其中 B_{15}、R、B_t 是以单个特征粒径的变化为基础来度量颗粒破碎，不能以级配整体的变化衡量颗粒破碎，以偏概全。颗粒破碎指标 B_r、I_G 考虑了颗粒破碎前后级配的整体变化，描述颗粒破碎量更加准确。但是分形级配方程对反 S 形级配曲线进行破碎指标 B_r 的计算时，不能很好的描述级配。而 Tyler 等[15-16]提出三维空间粒径分布分维模型，用颗粒质量来代替颗粒的体积，推导出计算土壤粒径分布分形维数的重量分布模型，该模型可以很好的全面反应颗粒破碎的粒径分布情况。因此本研究采用该模型计算出的分形维数 D 来度量颗粒破碎程度。分形维数 D 的计算公式为

$$L_g\left[\frac{M(r<d_i)}{M_{\mathrm{T}}}\right]=(3-D)L_g(d_i/d_{\max}) \tag{4}$$

式中：r 为粒径(mm)；$M(r<d_i)$ 为粒径小于粒径 d_i 的颗粒质量(kg)；M_{T} 全部颗粒的总质量(kg)；$d_{\max}$ 为粒组内最大粒径。

以 $L_g(d_i/d_{\max})$ 为横坐标，$L_g[M(r<d_i)/M_{\mathrm{T}}]$ 为纵坐标，则该直线的斜率为 3-D，从而可以得到试验前后不同级配试样的分形维数 D。再根据试验前后级配的分形维数变化来分析试验前后颗粒破碎特征。

3 颗粒破碎特征及影响因素分析

3.1 颗粒破碎的分形维数特征

根据试验前后各粒组的含量变化，由式(4)可得出不同级配、不同围压下的颗粒破碎的分形维数，见表 3、图 4。p_a 为大气压力。

表 3 试验前后不同级配试样分形维数汇总表

Tab. 3 Summary table of fractal dimension of different graded samples before and after the test

级配	分形维数 D				
	0 kPa	50 kPa	100 kPa	150 kPa	500 kPa
1	2.603	2.638	2.640	2.646	2.656
2	2.496	2.619	2.624	2.635	2.652
3	2.398	2.559	2.581	2.593	2.598
4	2.358	2.521	2.573	2.582	2.587

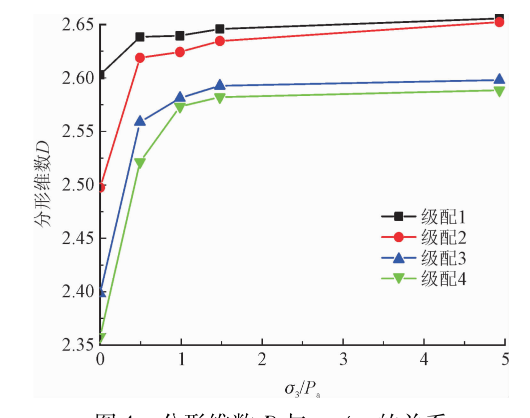


图 4 分形维数 D 与 σ_3/p_a 的关系

Fig. 4 Relationship between fractal dimension D and σ_3/p_a

chinaXiv:202212.00124v1

ChinaXiv合作期刊

从表 3 和图 4 可以看出，随着围压的增大，分形维数 D 逐渐增大，分形维数 D 和围压之间呈明显的非线性关系。随着试样从级配 1 变化到级配 4，即随着粗颗粒含量的增多，其分形维数逐渐减小。表明颗粒破碎表现出随围压增大而增大、随粗颗粒含量增大而增大的变化规律。

3.2　初始级配对颗粒破碎的影响

考虑到篇幅，本研究只选取 50 kPa、500 kPa 两种围压条件，压实度为 94% 的不同级配试样，在试验前后的不同粒径颗粒累计百分含量分布曲线进行分析，如图 5 所示。

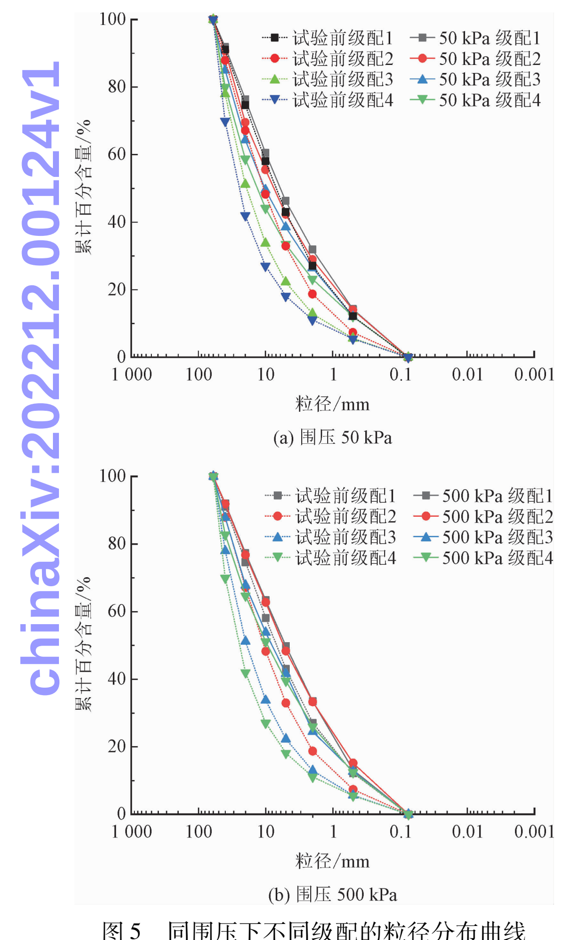


图 5　同围压下不同级配的粒径分布曲线

Fig. 5　Particle size distribution curves of different gradations under the same confining pressure

由图 5 可知，4 个级配试样试验后的级配曲线均往上移，表明粗颗粒含量减少、细颗粒含量增多，说明试验中发生了颗粒破碎，大颗粒破碎成小颗粒。级配 1 试样试验前后的级配曲线上移幅度最小，反应粒径变化最小，而级配 4 试样试验前后的级配曲线上移幅度最大，反应粒径变化最大。由此说明，随着粗颗粒含量的提高，颗粒破碎的程度增大。反映不同初始级配试样的粗颗粒含量大小对颗粒破碎的影响较大。

3.3　不同围压对颗粒破碎的影响

考虑到篇幅，以级配 1 与级配 4 为研究对象，分别研究级配 1、级配 4 试样在不同围压作用下的颗粒破碎程度。不同围压下的颗粒粒径含量变化曲线如图 6 所示。

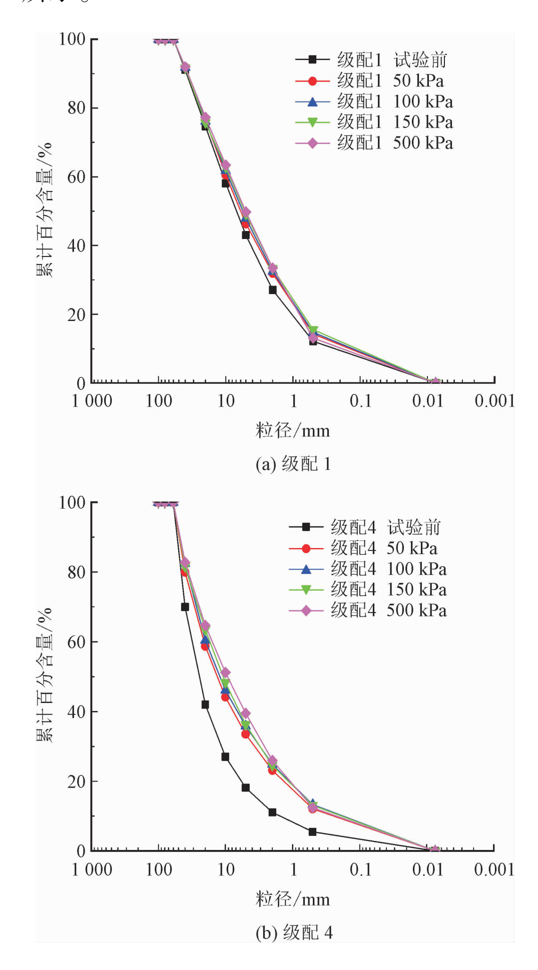


图 6　各级配试验前后的粒径分布曲线

Fig. 6　Particle size distribution curve of different gradations before and after the test

由图 6 可知，随围压增大，级配曲线均逐渐上移，各个粒径变化趋势一致。其中围压为 50 kPa 时，试验前后粒径变化幅度最小；围压为 500 kPa 时，试验前后粒径变化幅度最大。这说明围压的增加促进了颗粒的破碎。

3.4　不同压实度对颗粒破碎的影响

以级配 2 试样为例，在围压 100 kPa、压实度为

chinaXiv:202212.00124v1

92%、94%、96%的情况下,研究压实度对试验前后红砂岩粗粒料颗粒粒径的变化影响。图7为围压100 kPa下不同压实度粒径分布曲线。表4是不同压实度分形维数 D。

表4 不同压实度的分形维数 D

Tab. 4 Fractal dimension D in different compaction degrees

围压	状态	分形维数 D
100 kPa	92%	2.619 0
	94%	2.624 6
	96%	2.641 3

由图7和表4可知随着增幅为2%的压实度的提高,其试验后的级配曲线近乎重合,说明不同压实度下级配曲线变化后差异较小,试验后分形维数差异很小。因此得到压实度的变化对分形维数几乎没有影响。主要原因为压实度的提高使粗颗粒之间的镶嵌、咬合作用增强,增大颗粒之间的相互作用力,从而使粗粒土的峰值剪切强度提高,抑制颗粒破碎的程度。但在击实的同时,颗粒也发生了微小的破碎,因此分形维数整体呈现增加的趋势。

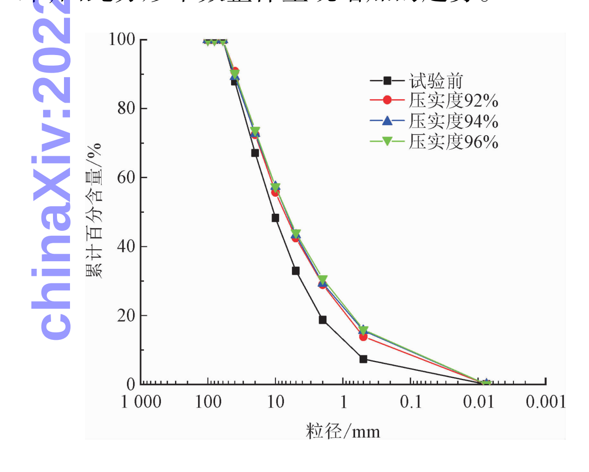


图7 不同压实度的粒径分布曲线

Fig. 7 Particle size distribution curves of different compaction and state

3.5 颗粒破碎对强度特性的影响

以相同压实度、不同围压、级配的4组试样为研究对象,研究了红砂岩粗粒料不同围压下的大型三轴剪切试验后颗粒破碎强度特性变化情况。由三轴试验结果整理得到的红砂岩粗粒土破坏峰值及内摩擦角详见见表5和表6。应力应变曲线如图8所示,峰值内摩擦角与分形维数的关系如图9所示。

表5 峰值强度 q_f

Tab. 5 Peak shear strength q_f

级配编号	压实度/%	$q_f=(\sigma_1-\sigma_3)_{\max}$/kPa			
		50 kPa	100 kPa	150 kPa	500 kPa
1	94	72.60	135.69	199.16	803.25
2	94	94.91	124.97	181.03	450.27
3	94	126.88	150.93	159.85	452.87
4	94	127.03	153.89	202.28	458.42

表6 峰值内摩擦角 φ_f 值

Tab. 6 Peak internal friction angle φ_f

级配编号	峰值内摩擦角 φ_f			
	σ_3 = 50 kPa	σ_3 = 100 kPa	σ_3 = 150 kPa	σ_3 = 500 kPa
1	24.8	23.8	23.6	26.5
2	29.3	22.9	22.2	18.1
3	34.3	25.5	20.4	18.2
4	34.1	25.8	23.8	18.4

由图8可知,不同围压下四种级配试样的应力-应变关系曲线均呈明显非线性特征,表现为双曲线关系。级配1在围压为50 kPa、100 kPa时,其应力应变曲线有峰值,表现为应变软化型,在围压为150 kPa、500 kPa时则无峰值,表现为应变硬化型,其余3个级配在4个围压下均无峰值,表现出应变硬化特性。

由表5、表6可知,随着围压的增大,各级配的试样峰值强度逐渐增大,而峰值内摩擦角逐渐减小;在低围情况下,随着粗颗粒含量增加,破坏峰值、内摩擦角都呈现递增的趋势;围压增大后,破坏峰值同样提高,而内摩擦角反而减小。这主要是因为,当围压较低时,相比细颗粒含量高的粗粒土,粗颗粒含量高的粗粒土,颗粒之间咬合程度更大,抵抗外界破坏的能力更强,不易发生破坏。当围压较大时,颗粒发生较大程度的破碎,导致细颗粒含量提高,粗粒土粗细颗粒分布较均匀,级配趋向良好、同时能承担较大的荷载。

由图9可知,对于级配2、3、4,峰值内摩擦角均呈现出随着分形维数 D 的增大而减小的规律;当峰值内摩擦角相同时,其分形维数 D 随着级配和粗颗粒含量的增大而减小。这主要因为与高围压相比,低围压下粗粒土的粗颗粒含量高,颗粒之间的咬合更大,颗粒在外荷载作用下不易发生较大程度的破碎,而随着围压增大,加剧颗粒之间的碰撞。

chinaXiv:202212.00124v1

ChinaXiv合作期刊
chinaXiv:202212.00124v1

图 8　不同级配、围压下的应力应变曲线

Fig. 8　Stress-strain curves under different gradations and confining pressures

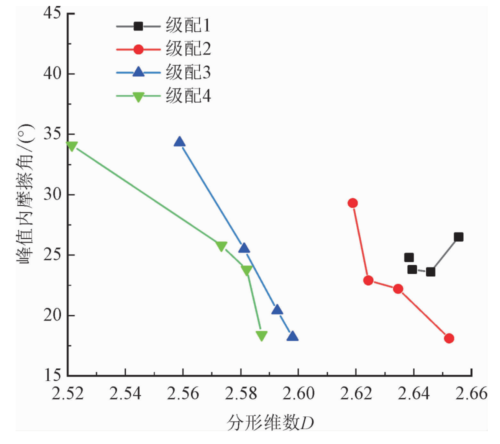


图 9　峰值内摩擦角与分形维数的关系

Fig. 9　Relationship between peak internal friction angle and fractal dimension

4　结　论

本研究在大型三轴试验基础上，采用分形维数研究了不同因素对红砂岩粗粒土的颗粒破碎影响，得到以下 4 点结论。

1）同一围压、压实度下，颗粒破碎程度随着不同级配试样中粗颗粒含量的增多而增大，其分形维数逐渐减小。

2）相同级配、压实度下，围压对试样剪切后的不同粒组颗粒累计百分含量影响较大，分形维数随围压增大而增大，表明颗粒破碎随围压增大而增大。

3）相同围压下的同一级配试样，随着压实度的提高，粗颗粒含量减少、细颗粒含量增多，但颗粒破碎程度增大的幅度很小。说明压实度的提高对颗粒破碎的影响较小，压实度对颗粒破碎的影响可以忽略。

4）低围压作用，试样的颗粒破碎程度小，峰值强度和内摩擦角较高。随围压不断增大，颗粒破碎程度加大，峰值强度与内摩擦角呈相反趋势的变化。

参考文献：

［1］　米占宽，李国英，陈铁林. 考虑颗粒破碎的堆石体本构模型［J］. 岩土工程学报，2007，29(12)：1865-1869.
MI Zhankuan, LI Guoying, CHEN Tielin. Constitutive model of rockfill body considering particle fragmentation［J］. Chinese journal of geotecnical engineering, 2007, 29 (12): 1865-1869 (in Chinese).

ChinaXiv合作期刊

[2] 郭熙灵,胡辉,包承纲. 堆石料颗粒破碎对剪胀性及抗剪强度的影响[J]. 岩土工程学报,1997,19(3):83-88.
GUO Xiling, HU Hui, BAO Chenggang. The influence of rockfill particle fragmentation on dilatancy and shear strength[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 1997, 19(3): 83-88 (in Chinese).
[3] 刘汉龙,秦红玉,高玉峰,等. 堆石粗粒料颗粒破碎试验研究[J]. 岩土力学,2005,26(4):562-566.
LIU Hanlong, QIN Hongyu, GAO Yufeng, et al. Experimental study on particle breaking of rockfill coarse-grained materials[J]. Rock and soil mechanics, 2005, 26(4): 562-566 (in Chinese).
[4] 蔡正银,李小梅,关云飞,等. 堆石料的颗粒破碎规律研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(5):923-929.
CAI Zhengyin, LI Xiaomei, GUAN Yunfei, et al. Research on the particle breaking law of rockfill materials[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2016, 38(5): 923-929 (in Chinese).
[5] 凌华,傅华,韩华强. 粗粒土强度和变形的级配影响试验研究[J]. 岩土工程学报,2017,39(增刊1):12-16.
LING Hua, FU Hua, HAN Huaqiang. Experimental study on the gradation influence of the strength and deformation of coarse-grained soil[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2017, 39(S1): 12-16 (in Chinese).
[6] 唐志强,李皋,石祥超,等. 岩石单轴冲击加载破碎特征分析[J]. 应用力学学报,2019,36(5):1076-1081.
TANG Zhiqiang, LI Gao, SHI Xiangchao, et al. Analysis of rock fracture characteristics under uniaxial impact loading[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2019, 36(5): 1076-1081 (in Chinese).
[7] 杜晓奇,司政,黄灵芝,等. 粗骨料颗粒形态和体积分数对混凝土单轴压缩性能的影响研究[J]. 应用力学学报,2020,37(4):1828-1834.
DU Xiaoqi, SI Zheng, HUANG Lingzhi, et al. Study on the influence of coarse aggregate particle shape and volume fraction on the uniaxial compression properties of concrete[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2020, 37(4): 1828-1834 (in Chinese).
[8] LEE K L, FARHOOMAND I. Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial conpression[J]. Canadian geotechnical journal, 1967, 4(1): 68-86.
[9] MARSAL R J. Large-scale testing of rockfills materials[J]. Journal of the soil mechanics and foundation engineering ASCE, 1967, 93(2): 27-44.
[10] NAKATA Y, HYDE A F L, HYODO M, et al. A probabilastic approch to sand particle crushing in the triaxialtest[J]. Geotechnique, 1999, 49(5): 567-583.
[11] MARSAL R J. Mechanical properties of rockfill embankment dam engineering[M]. New York: Wiley, 1973.
[12] HARDIN B O. Crushing of soil particle[J]. Journal of geotechnical engineering ASCE, 1985, 111(10): 1177-1192.
[13] MUIR W, MAEDA K. Changing grading of soil: Effect on critical state[J]. Acta geotechnica, 2008, 3(1): 3-14.
[14] 朱俊高,翁厚洋,吴晓铭,等. 粗粒料级配缩尺后压实密度试验研究[J]. 岩土力学,2010,31 (8):2394-2398.
ZHU Jungao, FENG Houyang, WU Xiaoming, et al. Experimental study on compaction density of coarse-grained materials after grading and scale reduction[J]. Rock and soil mechanics, 2010, 31(8): 2394-2398 (in Chinese).
[15] TYLER S W, WHEAT S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation[J]. Soil science society of America journal, 1989, 53: 987-996.
[16] TYLER S W, WHEAT S W. Fractal scaling of soil particle size distribution: Analysis and limitations[J]. Soil science society of America journal, 1992, 56: 362-369.

(编辑 史淑英)

chinaXiv:202212.00124v1